

**Zdeněk ČADA<sup>1</sup>, Vlastislav SALAJKA<sup>2</sup>, Petr HRADIL<sup>3</sup>, Viktor KANICKÝ<sup>4</sup>**

**ÚČINKY PŘÍRODNÍ A TECHNICKÉ SEIZMICITY NA STAVEBNÍ  
KONSTRUKCE V ČR**

**EFFECTS OF NATURAL AND TECHNICAL SEISMICITY ON BUILDING STRUCTURES  
IN CZECH REPUBLIC**

**Abstract**

The paper deals with the dynamic analysis of building structures, common within the territory of the Czech Republic. Seismic responses of four typical building structures have been computed, using FEM-based computation models. Seismic excitation specified by Eurocode 8 standard response spectra has been used. Levels of corresponding seismic responses have been compared with those, obtained by applying response spectra generated from two seismic records, considered as records with highest intensities registered at mining activities as well as earthquakes within the territory of Czech Republic in recent history. The performed analysis verifies that the application of EC8 spectra in seismic design provides a rather high safety of typical building structures in Czech Republic.

**1 ÚVOD**

V současné době se nejčastěji seizmické zatížení konstrukcí vyjadřuje pomocí lineárního spektra odezvy. V národních normativních dokumentech pro posuzování konstrukcí na seizmické účinky lze nalézt různá návrhová spektra odezvy sestavená na základě dlouhodobého sledování seizmických aktivit v daných oblastech. Pro Českou republiku je definována mapa seizmických oblastí v Národní příloze NA [1]. Tato mapa uvádí referenční špičkové zrychlení podloží  $a_{gR}$ . Významnější úroveň zrychlení je kolem 0,1 až 0,12 g. Z praktického hlediska je potřeba stanovit úroveň dynamické odezvy u obvyklých stavebních konstrukcí vznikající od seizmickým zatížení, které se blíží maximální úrovni pravděpodobné na území České republiky. Pro stanovení těchto odezev byly použity matematické modely vybraných konstrukcí [3] sestavené metodou konečných prvků (MKP) [2]. Seizmický model zatížení odpovídá spektru pružné odezvy dle normy Eurokód 8: „Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení“ [1] dále jen EC8. Toto normativní zatížení je porovnáváno se spektry sestavenými na základě seizmických záznamů, které byly naměřeny stanicemi na našem území.

Prvním analyzovaným jevem je přírodní seizmická událost zaznamenaná na stanici Jeroným (oblast: Čistá u Krásna nad Teplou, stanice JER1, aparatura PCM3-EPC2, snímač SM3 s vlastní frekvencí 0,5 Hz) ze dne 14. 10. 2008 [4]. Jde o nejsilnější projev kraslického roje 2008 s magnitudem 3,9, kdy epicentrum bylo v blízkosti obce Nový Kostel (asi 25 km od uvedené stanice) a ohniska zemětřesení byla lokalizována v hloubce 10 km. V dalším textu je tento záznam označován zkráceně pouze „Jeroným“.

---

<sup>1</sup> Ing. Zdeněk Čada, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: +420 541 147 116, +420 775 924 324, E-mail: [cada.z@fce.vutbr.cz](mailto:cada.z@fce.vutbr.cz).

<sup>2</sup> Doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.: Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: +420 541 147 365, +420 603 244 458, E-mail: [salajka.v@fce.vutbr.cz](mailto:salajka.v@fce.vutbr.cz).

<sup>3</sup> Ing. Petr Hradil, Ph.D.: Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: +420 541 147 366, +420 604 233 802, E-mail: [hradil.p@fce.vutbr.cz](mailto:hradil.p@fce.vutbr.cz).

<sup>4</sup> Doc. Ing. Viktor Kanický, CSc.: Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, 613 00 Brno, tel.: +420 545 572 697, +420 603 258 039, E-mail: [kanicky.v@fea.cz](mailto:kanicky.v@fea.cz).

Druhým analyzovaným jevem je důlně indukované zemětřesení zaznamenané na stanici Darkov (soliterní stanice v povrchovém objektu) na Karvinsku ze dne 4. 12. 2008, čas 6:54:32, lokální magnitudo 3,2 (podle GfÚ), epicentrální vzdálenost cca 3 km. Stanice je vybavena aparaturou PCM3-EPC2 se třemi snímači SM3 s vlastní frekvencí 0,5 Hz v geografickém uspořádání. V dalším textu je tento záznam označován zkráceně pouze „Darkov”.

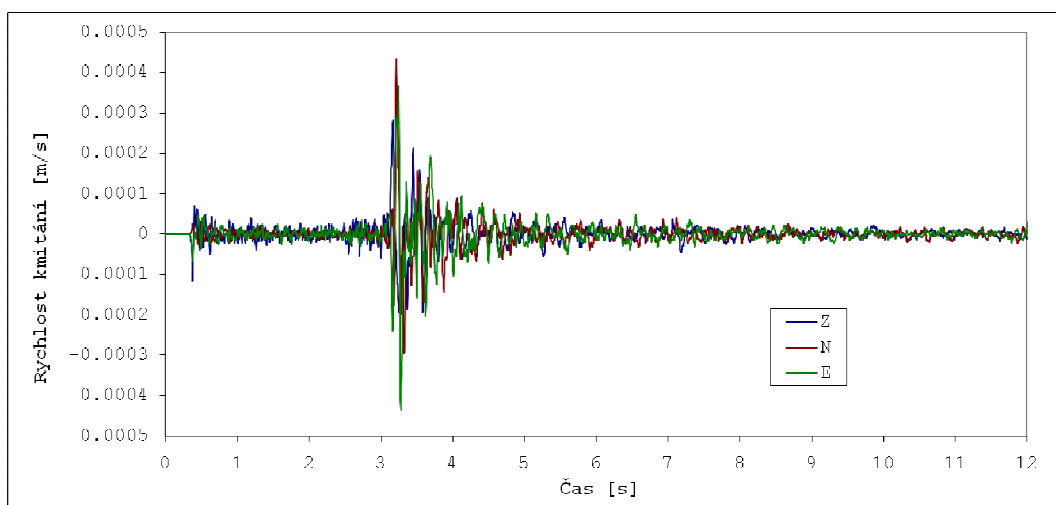
## 2 ANALÝZA ZÁZNAMŮ

Pro možnost porovnání získaných seizmických záznamů se zatížením podle normy byla sestavena jejich spektra odezvy [5, 6, 7]. Lineární spektra odezvy vyjadřují maximální dosažené odezvy jednostupňové soustavy (oscilátor s různou vlastní frekvencí) buzené obecnou časovou funkcí (seizmický záznam). Jedná se nejčastěji o odezvu ve zrychleních. Samotné generování spekter bylo provedeno pomocí programu ANSYS [2]. Program ANSYS vyžaduje pro generování spekter odezvy (jako vstupní funkci) průběh posunutí v čase, který byl získán numerickou integrací ze záznamů.

Charakter odezvy mechanické soustavy s více stupni volnosti v okolí vlastních frekvencí je analogický.

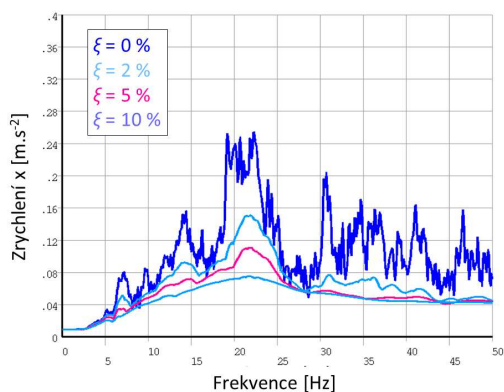
### 2.1 Záznam Jeroným

Naměřený průběh rychlostí seizmického jevu Jeroným ve třech kolmých směrech je uveden na obr. 1. Maximální dosažená rychlost vodorovného kmitání byla  $0,00045 \text{ m.s}^{-1}$ . Délka záznamu je 12 s se vzorkovací frekvencí záznamu 250 Hz.

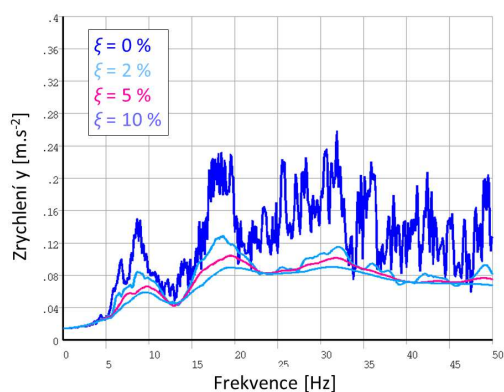


Obr.1: Záznam rychlostí Jeroným ve třech ortogonálních směrech

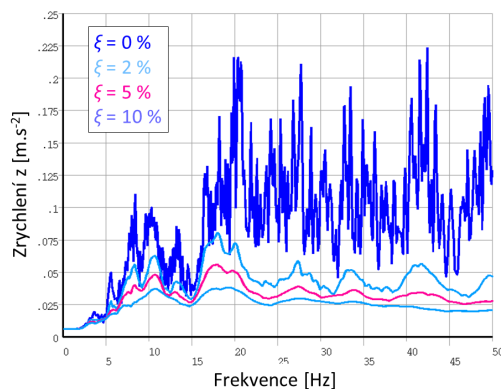
Výsledná spektra odezvy ve zrychleních pro jednotlivé směry a různé úrovně poměrného tlumení (0, 2, 5 a 10 %) jsou vykreslena na obr. 2 pro frekvenční oblast 0 až 50 Hz. Z obrázků je patrné, že významné hodnoty odezvy v závislosti na tlumení pro jednotlivé směry buzení se nacházejí od 18 Hz až po konec sledované frekvenční oblasti. U netlumené soustavy prakticky nenastává pokles spektrálních hodnot zrychlení i při významně vyšších frekvencích. U tlumených soustav lze vysledovat pomalý, ale jednoznačný pokles těchto spektrálních hodnot.



a)



b)

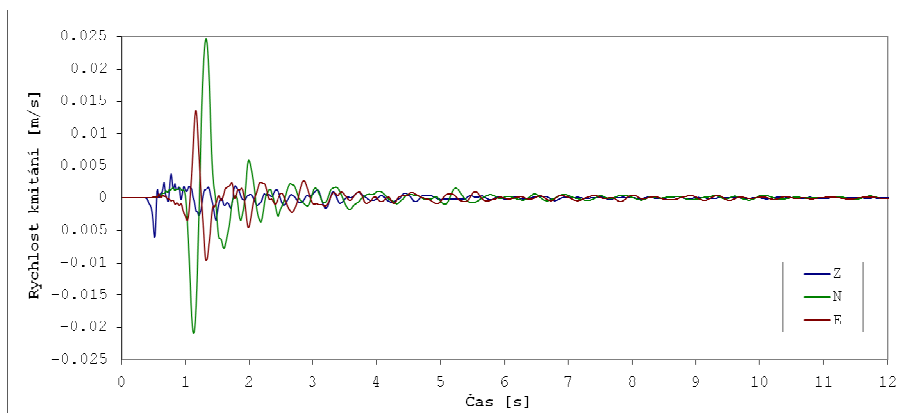


c)

Obr.2: Spektra odezvy zrychlení Jeroným pro různé úrovně tlumení 0, 2, 5, 10 %  
a) směr x (N), b) směr y (E), c) směr z

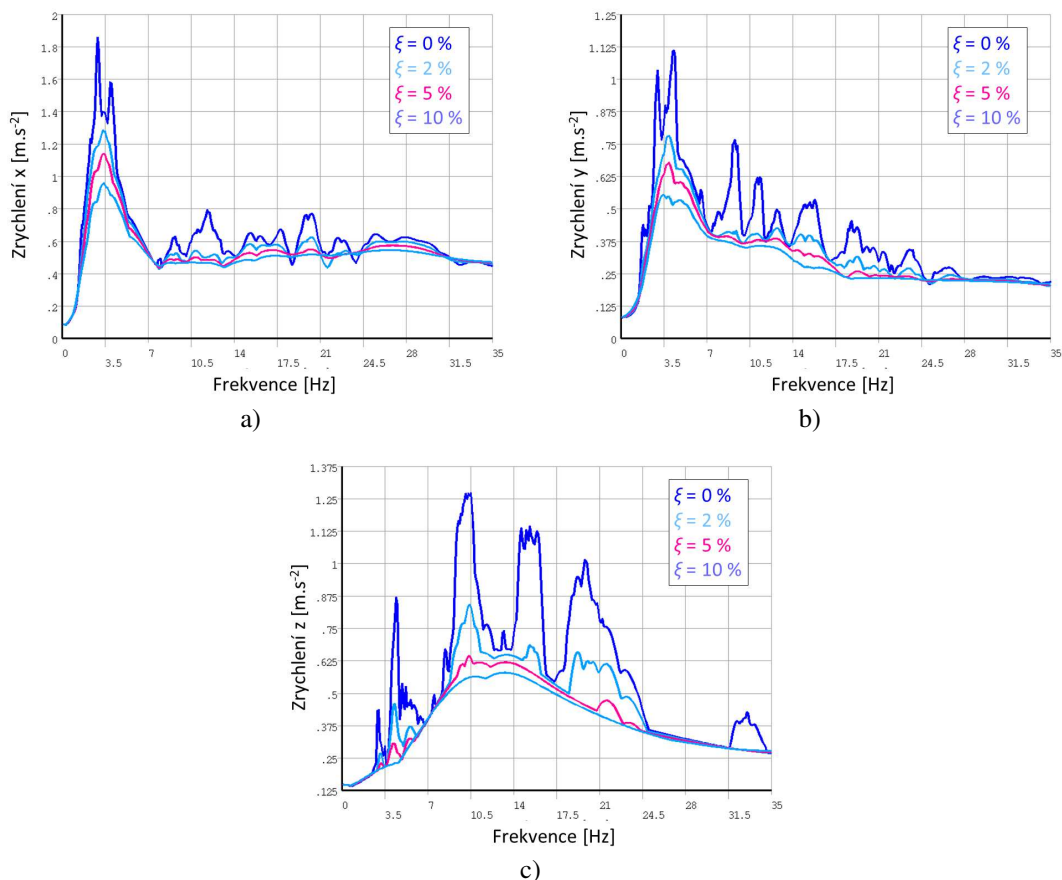
## 2.2 Záznam Darkov

Naměřený průběh seizmické události Darkov je zobrazen na obr. 3. Jedná se o záznam rychlosti ve třech ortogonálních směrech. Maximální dosažená rychlost vodorovného kmitání byla 0,025 m.s<sup>-1</sup>. Délka záznamu je opět 12 s s vzorkovací frekvencí záznamu 100 Hz.



Obr.3: Záznam rychlostí Darkov ve třech ortogonálních směrech

Vyčíslená spektra odezvy ve zrychleních pro jednotlivé směry a úrovně poměrného tlumení (0, 2, 5 a 10 %) jsou vykreslena na obr. 4 pro frekvenční oblast v rozsahu 0 až 35 Hz. Charakter spekter zrychlení je odlišný od spekter získaných ze záznamu Jeroným. Po prudkém nárůstu je dosaženo maximální odezvy již v oblasti 3 až 4 Hz ve směrech horizontálního buzení, což způsobují 1 dominantní vlna mezi 1,0 a 1,5 s. Spektrum pro svislý směr je odlišné od spekter pro horizontální směry s významnými spektrálními hodnotami zrychlení v okolí 4, 10, 15 a 20 Hz.



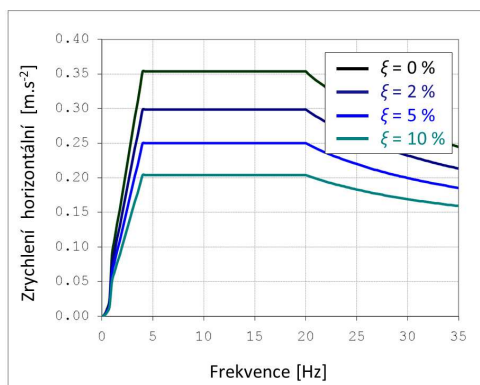
Obr.4: Spektra odezvy ve zrychleních Darkov pro různé úrovně tlumení 0, 2, 5, 10 %  
a) směr x (N), b) směr y (E), c) směr z

### 3 SPEKTRA ODEZVY PODLE EC8

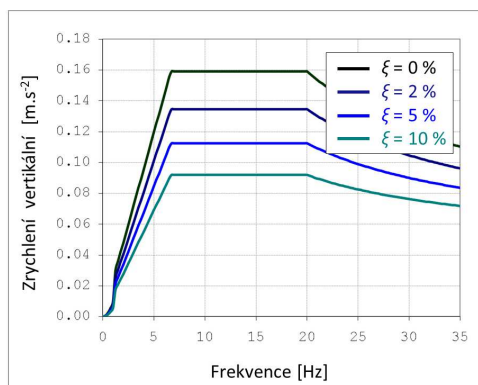
Tvar a velikost spekter odezvy pro oblast ČR je dána normou EC8 [1]. Spektra pružné odezvy v jednotlivých frekvenčních intervalech jsou popsána analytickými funkcemi v závislosti na typu zeminy, seizmické oblasti v dané zemi a třídě významu stavby. Spektra odezvy vychází ze sledování seizmických událostí v dané oblasti s danou pravděpodobností návratu. Tvoří obalové křivky všech možných seizmických jevů v oblasti. Návrhová spektra odezvy jsou odvozena ze spekter pružné odezvy v závislosti na typu konstrukce a použitého materiálu. Úprava spočívá v zavedení součinitele duktility. Součinitel duktility představuje poměr seizmických sil, kterým by konstrukce musela odolávat v dokonale pružném stavu při útlumu 5%, k seizmickým silám, které sledovaná konstrukce bezpečně přeneše. Je využíván pro výpočet I. mezního stavu.

Spektra pružné odezvy, která odpovídají lokalitě dolu Jeroným (typ spektra 2, typ základových púd A, třída významu II, návrhové zrychlení  $a_g = 0,10$  g), jsou vykreslena na obr. 5a, 5b. Podobně

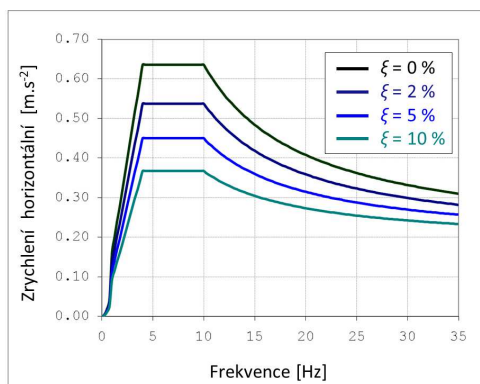
pak spektra pružné odezvy, která odpovídají lokalitě dolu Darkov (typ spektra 2, typ základových půd C, třída významu II, návrhové zrychlení  $a_g = 0,12$  g), jsou vykreslena na obr. 5c, 5d.



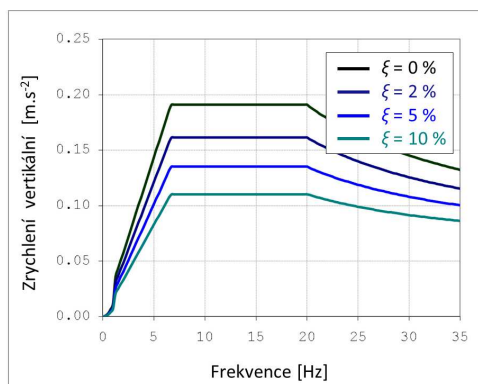
a)



b)



c)

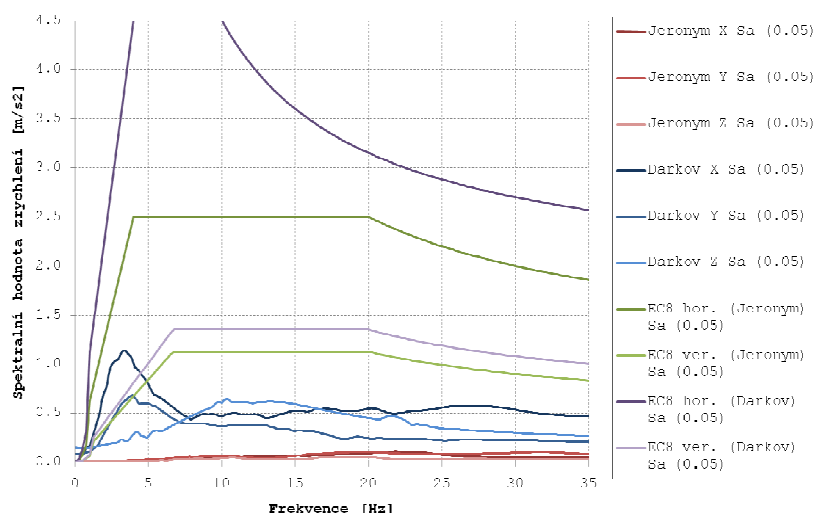


d)

Obr.5: Spektra pružné odezvy (EC8) pro úroveň tlumení 0, 2, 5, 10 %, a) směr horizontální, lokalita Jeroným, b) směr vertikální, lokalita Jeroným, c) směr horizontální, lokalita Darkov, d) směr vertikální, lokalita Darkov

#### 4 SROVNÁNÍ ÚROVNĚ ZATÍŽENÍ

Pro získání lepší představy o vzájemné velikosti sledovaných spekter je na obr. 6 vykreslen graf, ve kterém jsou vynesena spektra generovaná ze záznamů Jeroným a Darkov a spektra pružné odezvy dle EC8. Z grafu je zřejmá úroveň seizmického zatížení v závislosti na frekvenci a úrovni tlumení. Ve výpočtech odezev byla použita spektra odpovídající 5 % poměrného viskózního tlumení.



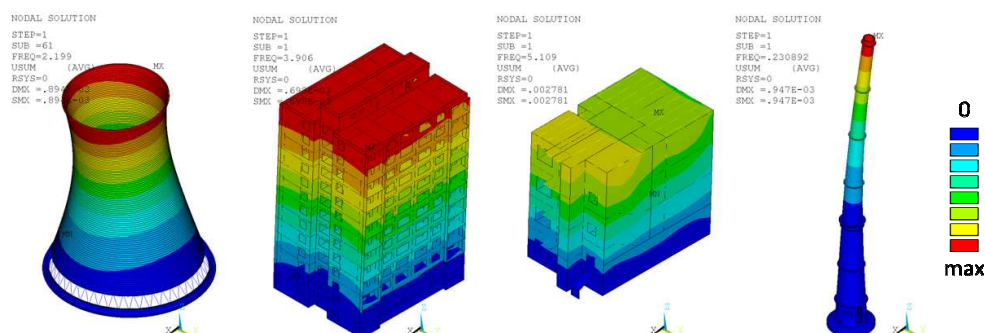
Obr. 6 Srovnání úrovně zatížení

## 5 VYBRANÉ STAVEBNÍ OBJEKTY A JEJICH VÝPOČTOVÉ MODELÝ

K posouzení významu přírodní a technické seizmicity z hlediska zatížení byly sestaveny výpočtové modely vybraných stavebních objektů. Zvoleny byly konstrukce:

- chladicí věž typu Itterson výšky 100 m (ŽB tenkostěnná konstrukce, rotační hyperboloid),
- panelový dům o 12-ti podlažích (výška 38 m, prefabrikované ŽB panely),
- zděný dům o třech podlažích (výška 13,5 m),
- komín (ŽB rotační kónická konstrukce, výška 280 m).

Při sestavování modelů konstrukcí metodou konečných prvků (MKP) v programovém systému ANSYS [2] byly použity objemové prvky (SOLID45) a skořepinové prvky (SHELL43). Modelovány byly pouze nosné konstrukce s přidáním hmotnosti nemodelovaných nenosných částí objektů. Pro každou konstrukci byly sestaveny dva výpočtové modely lišící se okrajovými podmínkami. Konstrukce je buď pevně uchycena v úrovni základu nebo je model doplněn o nehmotný blok spolupůsobící zeminy, který byl vytvořen pomocí objemových prvků. Zvolená šířka (resp. průměr) modelovaného bloku zeminy odpovídá 6-ti násobku výšky konstrukce, a hloubka trojnásobku výšky konstrukce. Základový nehmotný blok zeminy s proměnnou tuhostí mění se s hloubkou zohledňuje poddajnost v uložení konstrukce.



Obr. 7: První ohybové tvary vlastního kmitání jednotlivých modelů konstrukcí, pole celkových posunutí  $u_{SUM}$

## 6 VLASTNÍ FREKVENCE A VLASTNÍ TVARY KMITU KONSTRUKCÍ

Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitů konstrukcí byl proveden Lanczosovou metodou. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty dominantních frekvencí pro oba případy okrajových podmínek. Odpovídající ohybové tvary kmitu pro případ nepoddajného uložení jsou na obr. 7.

Tab. 1: Dominantní vlastní frekvence

| Objekt       | Nepoddajné uložení | Nehmotný základový blok |
|--------------|--------------------|-------------------------|
|              | [Hz]               | [Hz]                    |
| Chladicí věž | 2,199              | 1,531                   |
| Panelový dům | 3,906              | 0,755                   |
| Zděný dům    | 5,109              | 1,500                   |
| Komín        | 0,231              | 0,200                   |

Z tabulky je patrné, že modelování založení výrazně ovlivňuje hodnoty významných frekvencí a tím řešení s využitím spekter odezvy.

## 7 ODEZVA NA SEIZMICKÉ BUZENÍ

Odezva modelů na seizmické buzení byla řešena pomocí spektrální analýzy [1, 2, 5, 6]. Řešení je založeno na metodě rozkladu podle vlastních tvarů kmitu. Jednotlivé modální odezvy jsou počítány metodou CQC popřípadě SRSS. Z odezev pro směry  $x$ ,  $y$ ,  $z$  se sestavují kombinace [1]:

$$D_1 = 1,0 D_x + 0,3 D_y + 0,3 D_z \quad (1)$$

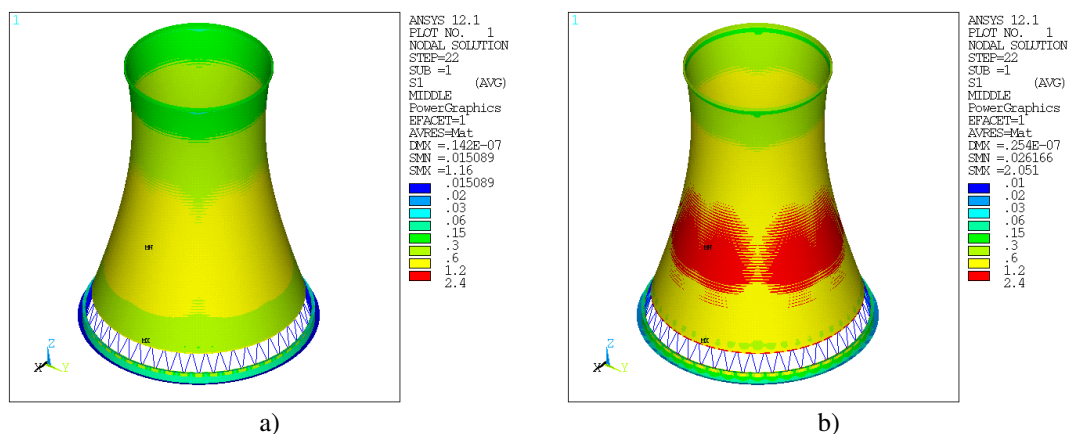
$$D_2 = 0,3 D_x + 1,0 D_y + 0,3 D_z \quad (2)$$

$$D_3 = 0,3 D_x + 0,3 D_y + 1,0 D_z \quad (3)$$

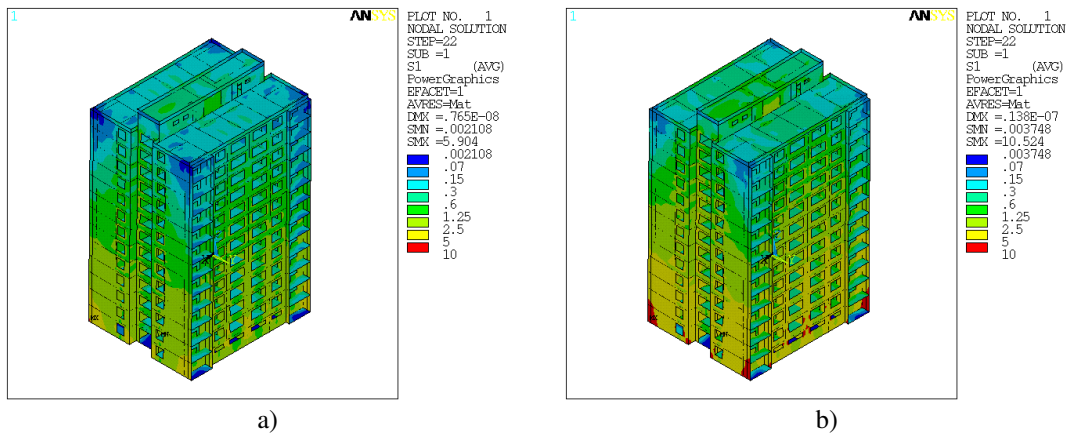
Výsledná odezva modelů na seizmické buzení je dána obálkou maxim z odezev  $D_1$  až  $D_3$ :

$$D_{tot} = \max\{D_1, D_2, D_3\} \quad (4)$$

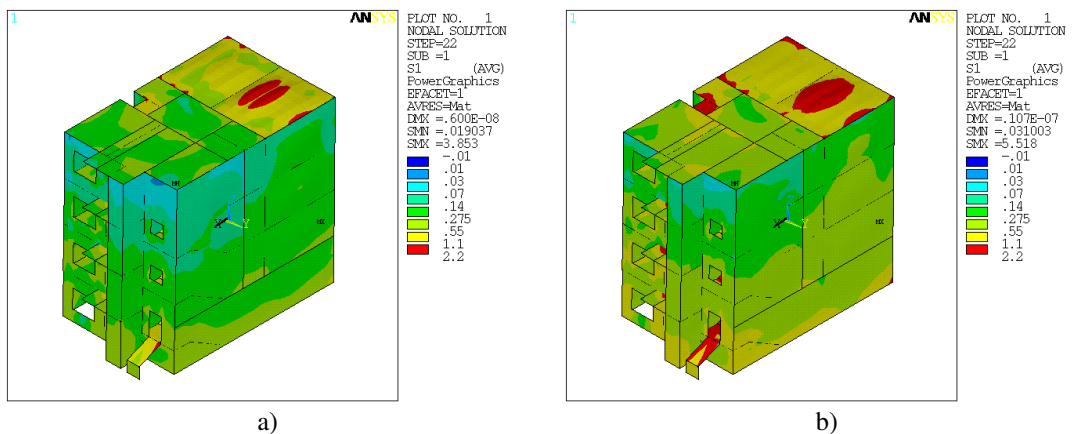
Na obr. 8 až 11 je vykreslena výsledná seizmická odezva, kdy jako základní buzení byla použita spektra pružné odezvy dle EC8. Na těchto obrázcích je vykresleno pole maximálního hlavního napětí. Vykreslené hodnoty napjatosti odpovídají kladnému znaménku u odmocniny při počítání podle pravidla SRSS. Uvedené výsledky se vztahují k případu nepoddajného uložení konstrukcí.



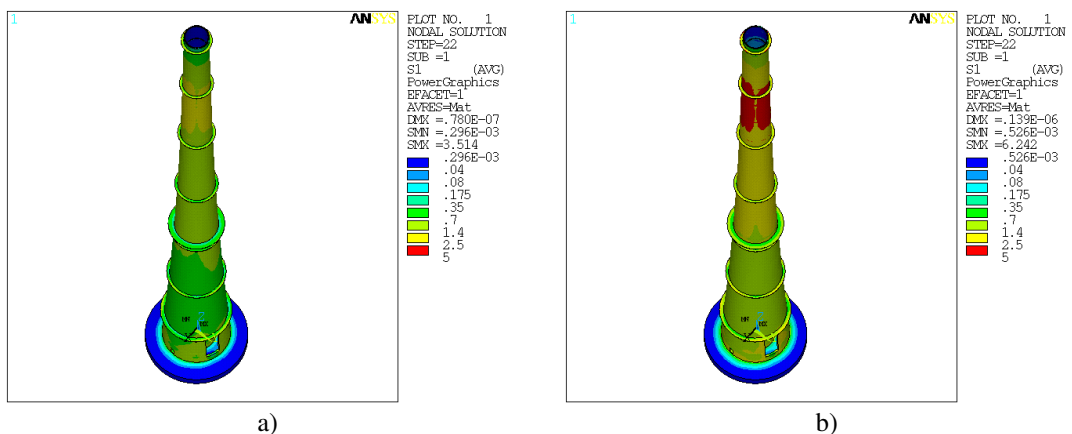
Obr. 8: Výsledná odezva (hlavní napětí  $\sigma_1$ [MPa]) na seizmické buzení - model chladicí věže, spektrum EC, lokalita: a) Jeroným, b) Darkov



Obr. 9: Výsledná odezva (hlavní napětí  $\sigma_1$ [MPa]) na seizmické buzení - model panelového domu spektrum EC, lokalita: a) Jeroným, b) Darkov



Obr. 10: Výsledná odezva (hlavní napětí  $\sigma_1$ [MPa]) na seizmické buzení - model zděného domu spektrum EC, lokalita: a) Jeroným, b) Darkov



Obr. 11: Výsledná odezva (hlavní napětí  $\sigma_1$ [MPa]) na seizmické buzení - model komínu spektrum EC, lokalita: a) Jeroným, b) Darkov



Zobrazené výsledky (obr. 8 až 11) jsou bez zahrnutí součinitele duktility, který nebyl uvažován z hlediska transparentnosti srovnání odezvy jednotlivých modelů a zatížení. Vykresleny jsou hodnoty maximálního hlavního tahového napětí, které u těchto typů konstrukcí (resp. použitých materiálů nosných konstrukcí), je nejvýznamnější z hlediska porušení. Ve výpočtu není zahrnuta vlastní tíha konstrukcí, vypočítané tvary lze uvažovat jako amplitudy kmitu kolem statické hodnoty. Výsledná tahová napětí z dynamického výpočtu jsou tedy snížena v oblastech (např. stěny), kde vlastní tíha vyvolává tlaková napětí. Oproti tomu v oblastech s tahovými napětími od vlastní tíhy (např. stropy), dochází k přetížení od dynamického zatížení.

V tab. 2 je provedeno srovnání výsledků výpočtů odezvy u jednotlivých výpočtových modelů. Srovnávána je hodnota  $\sigma_{1,max}$ , nebo-li maximální hodnota z pole hlavních napětí celého modelu konstrukce. Druhým srovnávaným parametrem je  $u_{sum,max}$ , nebo-li maximální hodnota z pole celkového posunutí celého modelu konstrukce. Hodnoty odezvy v tabulce u jevu Jeroným a jevu Darkov jsou získány odhadem na základě poměru spektrálních hodnot. Poměr odezvy byl stanoven z poměru hodnoty spektra EC8 a hodnoty ve spektru pružné odezvy jevu pro frekvenci odpovídající první dominantní vlastní frekvenci každého z modelů.

Tab. 2: Výsledky výpočtů - extrémní dynamické odezvy (posunutí a napětí)

| Objekt       | EC8<br>(lok.: Jeroným) |                  | Jev Jeroným<br>(odhad) |                  | EC8<br>(lok.: Darkov) |                  | Jev Darkov<br>(odhad) |                  |
|--------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
|              | $u_{sum,max}$          | $\sigma_{1,max}$ | $u_{sum,max}$          | $\sigma_{1,max}$ | $u_{sum,max}$         | $\sigma_{1,max}$ | $u_{sum,max}$         | $\sigma_{1,max}$ |
|              | [mm]                   | [MPa]            | [mm]                   | [MPa]            | [mm]                  | [MPa]            | [mm]                  | [MPa]            |
| Chladicí věž | ± 14,2                 | ± 1,2            | ± 0,7                  | ± 0,1            | ± 25,4                | ± 2,1            | ± 6,8                 | ± 0,5            |
| Panelový dům | ± 7,7                  | ± 5,9            | ± 0,4                  | ± 0,3            | ± 13,8                | ± 10,5           | ± 3,7                 | ± 2,8            |
| Zděný dům    | ± 6,5                  | ± 3,9            | ± 0,3                  | ± 0,2            | ± 10,7                | ± 5,5            | ± 2,8                 | ± 1,5            |
| Komín        | ± 78,0                 | ± 3,5            | ± 3,7                  | ± 0,2            | ± 138,7               | ± 6,2            | ± 37,0                | ± 1,7            |

## 8 ZÁVĚR

Na vybraných stavebních konstrukcích pomocí matematického modelování bylo ukázáno, jak budou jednotlivé prvky konstrukcí zatíženy při seizmické události. Dynamický výpočet byl proveden pomocí spekter pružné odezvy sestavených dle normy EC8 (Národní příloha NA) pro lokalitu Jeroným a Darkov. Výsledná odezva byla srovnána s odhadem odezvy na zemětřesení zaznamenané v těchto lokalitách. Odhad byl proveden na základě spekter odezvy, která byla vygenerována z digitálních záznamů rychlostí jevů. Přestože se jedná o nejsilnější projev kraslického roje 2008 (Jeroným) a velmi silný důlně indukovaný jev na Karvinsku (Darkov), hodnoty odezvy jsou několikanásobně menší (Jeroným asi 20x, Darkov asi 4x) než předepisuje norma pro tyto lokality.

Provedená studie potvrzuje, že aplikace spekter odezvy dle EC8 pro území České republiky zajišťuje konzervativně vysokou bezpečnost běžných stavebních konstrukcí.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Výzkumného záměru MSM 0021630519 – Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce a grantového projektu GAČR 103/09/2007 Vliv technické a přírodní seizmicity na statickou spolehlivost a životnost staveb.

## LITERATURA

- [1] EN 1998-1, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for building. Brussels: 2004.
- [2] ANSYS, Inc.: Release 12.1 Documentation for ANSYS. SAS IP, Inc 2009.
- [3] SALAJKA, V.: *Seizmická odezva konstrukcí*. Výzkumná zpráva v rámci projektu GAČR 105/04/1424 Odezva technologických konstrukcí a staveb na zatížení technickou seismicitou. Brno: VUT v Brně, 2006.
- [4] KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., KNEJZLÍK, J.: *Seizmické zatížení lokality dolu Jeroným v období kraslického roje v roce 2008*. . Hornická Příbram ve vědě a technice [CD-ROM], 2009, s. 1-7. 978-80-254-5090-1.
- [5] CHOPRA, A.: Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- [6] GUPTA, A. K.: *Response Spectrum Method*. In Seismic Analysis and Design of Structures. United States of America: CRC Press, 1992.
- [7] ČADA, Z., HRADIL, P., KANICKÝ, V., SALAJKA, V.: Vliv modelování založení konstrukce a modelování styků mezi panely mnohopodlažního panelového domu na jeho dynamickou odezvu při seismické události. Plzeň 2009. ISBN-978-80-254-5437-4

### Oponentní posudek vypracoval:

Doc. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D., Univerzita Karlova Praha